

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТЕХНОЛОГІЇ ПОВОДЖЕННЯ З ДИГЕСТАТОМ РІЗНОГО ГЕНЕЗИСУ

П. О. Скворцова¹, І. Ю. Аблєєва¹¹Сумський державний університет, Суми, Україна

УДК 502.1:[631.86:631.433.2:631.53.03:635.649]

DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.7

Отримано: 17 листопада 2023

Прийнято: 24 квітня 2024

Cite as: Skvortsova P., Ablieeva I. (2024). Environmental safety of the technology of handling digestate of different genesis. Technogenic and ecological safety, 15(1/2024), 67–74. doi: 10.52363/2522-1892.2024.1.7

Анотація

У сучасному світі набирає обертів біогазова технологія як екологічна альтернатива виробництва біодобрива після анаеробного збродження різних видів відходів. Через велику кількість органічних, поживних і біологічно активних речовин біогазові дигестати часто вносять безпосередньо в ґрунт як органічне добриво для покращання його якості та збільшення врожайності.

Мета статті полягає у визначенні екологічної безпеки дигестату, отриманого після анаеробного збродження курячого посліду та осаду стічних вод, у складі біокомпозиту для очищення ґрунтів від важких металів. Методологічною основою цього дослідження стали експерименти з фітотоксичності зразків дигестату на підставі результатів пророщення насіння перцю в чашах Петрі із застосуванням водних розчинів необробленого дигестату та дигестату, обробленого фосфогіпсом. Доцільність вибору способу оброблення фосфогіпсом була обумовлена не лише можливістю зменшити наявність патогенів у дигестатах, а й отримати біокомпозит, здатний адсорбувати шкідливі елементи з ґрунту та живити його необхідними речовинами. За допомогою індексу проростання оцінено рівень фітотоксичності дигестату на основі різних органічних відходів, обґрунтовано ефективність застосування дигестату як біологічного добрива.

Визначено, що екологічно безпечним субстратом для проростання насіння перцю став дигестат на основі осаду стічних вод. Дигестат із курячого посліду оброблений фосфогіпсом на 20-ту добу анаеробного збродження проявив фітотоксичний вплив на насіння перцю. Показники індексу проростання підвищилися на 30-ту добу проведення анаеробного збродження, що свідчить про зниження токсичності матеріалу після завершення процесу анаеробного збродження. Загалом індекс проростання вище ніж 50 % спостерігали в усіх зразках необробленого дигестату та більшій кількості зразків обробленого дигестату для обох субстратів. У статті надані рекомендації щодо оцінювання зрілості дигестату за допомогою індексу проростання насіння як швидкого індикатора визначення фітотоксичності субстратів і відповідно рівня екологічної безпеки матеріалу для ґрунту та рослин.

Ключові слова: анаеробне збродження, біокомпозит, деградація ґрунтів, курячий послід, осад стічних вод, фосфогіпс, фітотоксичність.

Постановка проблеми

Біогазова технологія стала одним із підходів, здатних вирішити низку питань екологічної безпеки, продовольчої безпеки, органічного землекористування та сталого розвитку. За допомогою біогазової технології переробляють органічні відходи, що значно знижує техногенне навантаження на довкілля. Так, у країнах Європейського Союзу у 2021 році було використано 211,3 млн т сировини для отримання близько 176,4 млн т дигестату [1]. Що стосується України, то країна має значний енергетичний потенціал біомаси – 118 810 тис. т, проте використовує лише 11,3 % [2].

Останнім часом відбувається розширення цього сектору з особливою зацікавленістю в дослідженні дигестату – зброженої маси, що залишається після анаеробного збродження субстратів різного генезису. Велика кількість утвореного дигестату потребує раціонального управління й пошуку найбільш екологічно безпечних рішень і технологій щодо сталого використання та виробництва на його основі біокомпозитних матеріалів для очищення ґрунтів.

Ймовірними технологічними рішеннями використання дигестату є [3]:

– виробництво біодобрив на основі дигестату з обов'язковим додержанням контролю його складу

для живлення рослин необхідними елементами та поліпшення властивостей самого ґрунту;

– стабілізація дигестату завдяки технології компостування для зменшення викидів парникових газів у атмосферу, запобігання евтрофікації водойм; компост на основі дигестату може замінити використання мінеральних добрив;

– відновлення поживних речовин із дигестату, наприклад, повторне використання фосфору з рідкої фракції дигестату, що забезпечить баланс між дефіцитними та профіцитними районами;

– піроліз дигестату з отриманням біоچارу (вугілля), що покращує вихід біогазу та може застосовуватися як паливо й збагатити ґрунт;

– використання дигестату на основі сільськогосподарських відходів для виробництва біоетанолу за допомогою ферментації;

– додавання дигестату як єдиного джерела поживних речовин під час гідропонного вирощування рослин.

Виснаження родовищ невідновлюваних ресурсів приводить до розвитку стратегій щодо повторного використання чи повернення цінних компонентів, тому досить перспективною технологією є застосування дигестату як біодобрива та заміщення використання мінеральних добрив [4]. Анаеробний дигестат містить у своєму складі основні елементи живлення (фосфор, азот і калій), що можуть бути

переведені в доступні для рослин форми [5]. Крім того, органічна речовина дигестату має потенціал до підвищення гуміфікації, родючості ґрунту та зв'язування важких металів у забруднених ґрунтах завдяки комплексоутворенню [6].

Проблема забруднення ґрунтів, особливо важкими металами, є досить актуальною на сьогодні. Зокрема, для України гостро постало питання наслідків бойових дій, що мають вплив на всі компоненти екосистеми. Воєнно-техногенне навантаження є потужним джерелом забруднення ґрунту важкими металами внаслідок постійних ризиків різноманітних снарядів і використання техніки [7, 8]. Проби ґрунтів сільськогосподарського призначення з місць падіння авіабомб і розбитої техніки в Сумській області свідчать про значне перевищення концентрацій важких металів, зокрема, свинцю, цинку, кадмію, міді, марганцю, нікелю та заліза [9].

Незважаючи на те, що важкі метали природно наявні в ґрунті та необхідні в малих концентраціях для росту й розвитку рослин, активна антропогенна діяльність призвела до їх накопичення в земельному покриві до критичного рівня [10]. Цей тип забруднення потребує заходів щодо усунення токсичного впливу, насамперед для ведення екологічно безпечного сільського господарства. Важливу роль у біоремедіації ґрунтів відіграють мікроорганізми, які в складі консорціумів здатні демонструвати більшу метаболічну універсальність до складних забруднювачів [11].

Відстежування шляху дигестату від його утворення з органічних відходів до виробництва біодобрив і біокомпозитів на його основі з подальшим використанням для відновлення властивостей ґрунту та отримання якісних продуктів харчування є важливим завданням з огляду на екологічну безпеку.

Автори статті попередньо розробили технологію для ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами, в якій дигестат використовували в складі біокомпозиту разом із фосфогіпсом як біоносієм для поглинання токсичних речовин. Ця технологія ґрунтується на процесах сорбції важких металів мікроорганізмами, акумульованими в дигестаті та на біоносії, здатних зв'язувати токсичні речовини в процесах власного метаболізму [12].

Досить часто постає завдання очищення ґрунтів від важких металів, використовуваних для сільськогосподарського призначення та вирощування рослин. Відповідно наступним етапом досліджень стало питання щодо рівня екологічної безпеки та якості дигестату для безпечного використання запропонованої технології біоремедіації ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Результати останніх досліджень показують, що питання екологічної безпеки застосування дигестату не є однозначним та потребує проведення додаткових досліджень. Деякі вчені вважають, що його використання може призвести до екологічних ризиків через наявність патогенів, залишків

фармацевтичних препаратів, антибіотиків, генів, бур'янів тощо [13], інші ж, навпаки, стимулюють його використання як біодобрива [14]. Вміст поживних речовин, гумінових речовин і мікроелементів у дигестаті визначає його удобрювальну цінність. Водночас перевищення вмісту окремих видів забруднювальних речовин обмежує перелік застосування або унеможливає подальше використання без додаткового оброблення. Автори [4] розробили систему індикаторів, на яких ґрунтується система контролю якості дигестату, для визначення шляхів покращання його якості.

Таким чином, із появою все більш жорстких екологічних вимог і стандартів якості стає очевидним, що дигестат залежно від типу сировини, використовуваної для анаеробного зброджування, технологічних режимів і параметрів процесу, може потребувати попереднього очищення перед внесенням у ґрунт. Залежно від застосовуваного процесу методи постоброблення дигестату поділяють на три групи: фізичні (подрібнення, опромінення, мікрохвилі, паровий вибух, рідка гаряча вода), хімічні (лужні, кислі, розчин амоніаку, окиснювальні, вологе окиснення, неорганічні солі), біологічні (ферментативні, грибові) [15].

Існує практика висушування твердого дигестату з подальшим гранулюванням або компостуванням, що сприяє стабілізації його органічної складової та зручності під час перевезення. Початковим етапом для сирого дигестату може стати просіювання, шнековий прес або центрифугування, що дозволяє залишити певні речовини у твердій фракції [16].

Використання таких сорбентів, як цеоліти, активоване вугілля, біовугілля та діатоміт, є перспективним напрямком, оскільки вони дозволяють очищувати дигестат від токсинів, скорочувати викиди парникових газів і відновлювати поживні речовини. Гідровугілля застосовують для сорбції амонійного азоту з дигестату. А лужне (гідроксид калію, гідроксид натрію) оброблення сорбентів дозволяє підвищити їх сорбційні властивості [17].

Застосування оброблення дигестату є стратегією не лише для зменшення наявності патогенів, нестабільності дигестату тощо, а й для одержання біосорбційного матеріалу (композиту), призначеного для очищення ґрунту від солей важких металів. Додавання фосфогіпсу (ФГ) спрямоване на одержання такого біокомпозиту, застосування якого сприяє ефективній біоремедіації забруднених ґрунтів, як було показано в наших попередніх працях [12]. Крім того, ФГ має у своєму складі поживні речовини, необхідні для розвитку як рослин, так і ґрунтової мікрофлори. Однак відмічається обмеженість проведених досліджень щодо впливу дигестату на рослини в складі біокомпозиту та за умови постоброблення.

Склад та якість дигестату залежать переважно від типу субстрату, використовуваного для анаеробного зброджування. Відповідно й тип постоброблення дигестату повинен залежати від значень показників рН, вмісту азоту, фосфору,

вуглецю, важких металів тощо. Основними субстратами на сьогодні є відходи тваринництва (гній свиней і великої рогатої худоби, курячий послід), рослинні відходи та сільськогосподарські залишки (стебла кукурудзи, силос), харчові відходи, осад стічних вод очисних споруд. Крім того, технологія спільного зброджування кількох видів відходів (наприклад, гній і рослинні рештки) має вищі значення показників виходу біогазу й якості дигестату [18]. Проте застосування того чи іншого субстрату залежить передусім від наявності місцевої сировини. Для України найбільш поширеним є використання гною свиней, великої рогатої худоби, курячого посліду, відходів цукрового та спиртового виробництва, силосу кукурудзи для біогазових заводів [19, 20].

Через свою простоту та надійність найбільш широко використовуваним сьогодні є індекс проростання насіння, що належить до біологічного індикатора оцінювання зрілості дигестату та фітотоксичності як показника екологічної безпеки. Цей тест має матричний підхід, оскільки враховує джерело забруднення в матриці та взаємодію токсичних компонентів [21]. Через те що дигестат із гною тварин може мати високу концентрацію амоніаку, дигестат із харчових відходів – летких органічних кислот, дигестат із осаду стічних вод – численних токсичних органічних сполук і металів, то для мінімізації екологічних ризиків у польових масштабах варто визначити ступінь фітотоксичності матеріалу [22, 23].

Для визначення ступеня екологічної безпеки дигестату для рослин у разі застосування його в складі біокомпозиту ефективним є проведення фітотестування з різними випробними рослинами. Автори [24] встановили, що рідка фракція дигестату на основі коров'ячого гною мала незначний вплив на проростання насіння капусти пак-чой під час тестування на визначення фітотоксичності. На динаміку стабільності рідкої фракції як біодобрива впливали температура, спосіб зберігання та концентрація розведення деіонізованою водою. Індекс проростання дорівнював нулю в разі використання 100 % рідкої фракції, що свідчить про токсичність матеріалу. Індекс збільшувався в зразках зі зменшеною концентрацією рідкої фракції дигестату, засвідчуючи те, що розведення водою може знизити фітотоксичний вплив на рослини. Відкрите зберігання сировини за температури 30 °C впродовж 60 діб та за температури 20 °C впродовж 90 діб, герметичне зберігання сировини за температури 30 °C впродовж 120 діб і за температури 20 °C впродовж 150 діб із подальшим використанням для сільськогосподарських цілей було безпечним, оскільки сприяло зникненню токсинів під час зберігання.

Таким чином, застосування раціональних методів оброблення дигестату та проведення тестів на визначення фітотоксичних компонентів є дуже важливими заходами, тому що зброджений субстрат усе ж таки може містити складні органічні елементи, патогенні бактерії, солі, а також ще не повністю біорозкладену органічну фракцію, що

негативно впливає на ґрунт. Оскільки дигестат має змінний склад, що залежить від типу вихідної сировини, це значно ускладнює процес оцінювання життєвого циклу, екологічних ризиків і наслідків його використання в складі біокомпозиту [25].

Постановка завдання та його вирішення

Мета статті полягає у визначенні екологічної безпеки дигестату, отриманого після анаеробного зброджування курячого посліду та осаду стічних вод, у складі біокомпозиту для очищення ґрунтів від важких металів.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено такі завдання дослідження:

- провести експериментальні дослідження щодо рівня екологічної безпеки дигестату на основі тесту з пророщення насіння перцю в чашках Петрі із застосуванням водних розчинів необробленого дигестату та дигестату з додаванням ФГ;
- за допомогою індексу проростання оцінити рівень фітотоксичності дигестату на основі двох видів місцевої сировини (курячого посліду та осаду стічних вод);
- обґрунтувати ефективність застосування дигестату в складі біокомпозитів для очищення ґрунту від важких металів з огляду на екологічну безпеку, зокрема, для вирощуваних рослин.

Методика проведення експерименту

Для проведення дослідження використовували зразки дигестату на основі двох видів субстрату: курячого посліду, що є одним із найбільш поширених видів сировини для України, та осаду стічних вод, з огляду на об'єми утворення в Україні [26] та успішність використання за кордоном. Експеримент проводили на базі лабораторії біогазових технологій (м. Суми, Україна). Курячий послід відібрано на птахофермі в Сумському районі, а осад стічних вод – на міських очисних спорудах у м. Суми.

Чотири лабораторні скляні анаеробні біореактори з газовідвідними трубками завантажували відповідними видами субстрату для проведення анаеробного зброджування (АЗ) за температури, що відповідає мезофільному режиму. На 20-ту добу проведення процесу АЗ відбирали по 3 повторення для кожного зразка дигестату з двох тестових біореакторів, у які потім додавали ФГ. Вибір такого виду оброблення обумовлювався типами субстрату, зокрема курячого посліду, збагаченого на сульфур і нітроген. Крім того, оброблення ФГ має низку вищеописаних переваг. Після оброблення процес продовжували ще 10 діб, так само як у двох контрольних біореакторах, матеріал яких не підлягав обробленню.

Таким чином, дослідженню підлягали 30 зразків дигестату: 6 – зразки сирого дигестату, відібрані на 20-ту добу з тестових біореакторів до оброблення; 6 – зразки сирого дигестату, відібрані на 20-ту добу з контрольних біореакторів; 6 – зразки дигестату, відібрані на 20-ту добу з тестових біореакторів після оброблення; 6 – зразки дигестату після проведення АЗ, відібрані на 30-ту добу з тестових біореакторів;

б – зразки дигестату після проведення АЗ, відібрані на 30-ту добу з контрольних біореакторів. Відібрані зразки дигестату аналізували для визначення різних показників, зокрема, вмісту органічного вуглецю, загального та амонійного азоту, важких металів, мікробіологічних показників, за методиками, описаними в працях [27, 28].

Для кращого розуміння та наочного уявлення було запропоновано кодування зразків (табл. 1), де Г, С – типи субстрату (курячий послід та осад стічних вод відповідно); 1, 2, 3 – зразки кожного з них, що відповідають трьом повторенням; Т – зразки з тестових біореакторів на 20-ту добу АЗ до оброблення; К – зразки з контрольних біореакторів на 20-ту добу АЗ; О – оброблені зразки з тестових біореакторів; ТП – зразки з тестових біореакторів після оброблення на 30-ту добу АЗ; КП – зразки з контрольних (необроблені) біореакторів на 30-ту добу АЗ.

Таблиця 1 – Кодування зразків субстратів

Необроблені зразки (20-та доба АЗ)		Оброблені зразки (20-та доба АЗ)		Оброблені та необроблені зразки (30-та доба АЗ)	
Г1Т	С1Т	Г1О	С1О	Г1ТП	С1ТП
Г2Т	С2Т	Г2О	С2О	Г2ТП	С2ТП
Г3Т	С3Т	Г3О	С3О	Г3ТП	С3ТП
Г1К	С1К	–	–	Г1КП	С1КП
Г2К	С2К	–	–	Г2КП	С2КП
Г3К	С3К	–	–	Г3КП	С3КП

Визначення фітотоксичності дигестату виконували відповідно до методики, описаної в міжнародному стандарті ISO 18763:2016 [29], та праці [24]. Для експерименту щодо визначення фітотоксичності дигестату було обрано насіння перцю як представника родини Пасльонові, що часто використовують для фітотестування. Насіння пророщували в чашах Петрі, в кожному з яких поміщали по 20 насінин та 10 % розчин дигестату (розведений у 10 разів).

Зразки інкубували в темряві упродовж п'яти діб. Кожного дня в однаковий час вимірювали температуру повітря та вологість, адже проростання є не лише одним із найважливіших процесів репродуктивного циклу рослин, а й свідченням реакції виду на зміну умов довкілля. Після завершення періоду інкубації зразки діставали з темного місця та виконували відповідні вимірювання. Аналізували одержані дані за допомогою рівняння, що відображає індекс проростання насіння [30]:

$$GI = \frac{G_t \cdot R_t}{G_c \cdot R_c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де GI – індекс проростання насіння, %; G_t – середня кількість пророслого насіння в експериментальних зразках дигестату, шт.; R_t – середня довжина корінців насіння в експериментальних зразках дигестату, мм; G_c – середня кількість пророслого насіння в контрольних зразках дигестату, шт.; R_c – середня довжина корінців насіння в контрольних зразках дигестату, мм.

Статистична значущість результатів обумовлювалася розрахунком середнього значення для трьох повторів кожного типу сирого дигестату до оброблення / контрольного зразка та оброблених зразків на 20-ту добу / на 30-ту добу АЗ кількості насінин, які проросли, та довжини їх корінців. Для визначення рівня фітотоксичності дигестату була обрана межа відповідно до [30]: дигестат вважали прийнятним для використання в рослинництві за індексу проростання насіння більше ніж 50 %.

Виклад основного матеріалу

Зрілість дигестату та рівень його токсичності можна оцінити застосувавши тести на фітотоксичність для попередження екологічних ризиків і загроз. Нестабільний дигестат може стати перешкодою для отримання якісної продукції та справжнім конкурентом для сільськогосподарських культур у боротьбі за кисень через недостатнє біорозкладання органічної речовини [31].

Результати експерименту з пророщування насіння перцю для двох типів дигестату на основі курячого посліду та осаду стічних вод на 20-ту й 30-ту доби проведення АЗ наведено на рис. 1 і 2 (відповідно). Значення температури та відносної вологості повітря робочої зони під час проведення всіх досліджень не підтримували на постійному рівні, проте вони перебували в допустимому діапазоні.

Для дослідження використовували весь дигестат, оскільки не ставили завдання визначення фітотоксичності окремих його фракцій. Крім того, за допомогою попередніх досліджень [32] встановлено, що під час розділення дигестату на рідку й тверду фракції відбувається розподіл елементів. Розчинні елементи, зокрема, нітроген, калій, сірка, переходять до рідкої фракції під час центрифугування. Натомість тверда фракція дигестату може бути позбавлена потрібної кількості поживних речовин у необхідних кількостях. З огляду на це може спостерігатися негативний вплив на ріст насіння, що виражається через низьке значення індексу проростання.

Зразки на основі осаду стічних вод, що були відібрані як на 20-ту добу, так і на 30-ту добу проведення АЗ для необробленого дигестату та обробленого ФГ, показали високі результати індексу проростання насіння, які перетнули поріг 50 %. У процесі анаеробного зброджування органічна частина субстрату деградується та переходить у неорганічну частину у вигляді біогазу. Саме тому індекс проростання на 30-ту добу проведення АЗ був нижчий, ніж на 20-ту добу, хоча й перебував у межах допустимої норми.

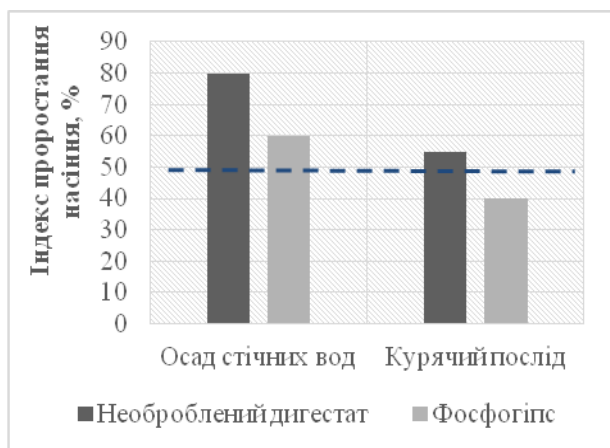


Рисунок 1 – Індекс проростання насіння на 20-ту добу проведення АЗ

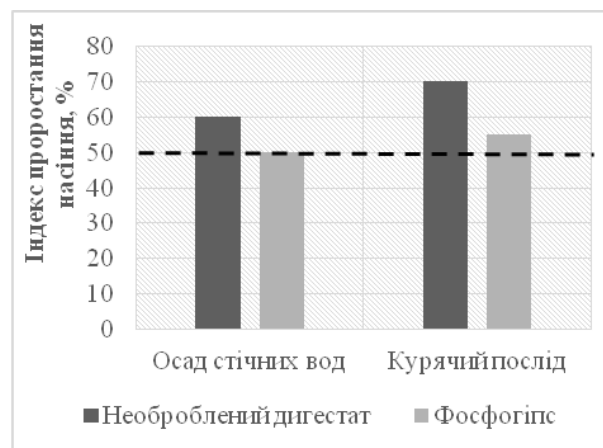


Рисунок 2 – Індекс проростання насіння на 30-ту добу проведення АЗ

Нижчий відсоток проростання був характерний для дигестату на основі курячого посліду, оскільки він мав більший біометановий потенціал, а відповідно, менший вміст поживних речовин у дигестаті. Показники індексу проростання були вищими в необробленому дигестаті, ніж у дигестаті, обробленому ФГ.

Різні види субстратів мають неоднаковий вплив на ріст насіння рослин. У цьому дослідженні дигестат на основі курячого посліду мав нижчі показники індексу проростання насіння перцю на 20-ту добу проведення АЗ, які підвищувалися на 30-ту добу, що свідчить про зниження токсичності матеріалу після закінчення АЗ. Дигестат на основі курячого посліду може містити сліди антибіотиків і пестицидів [33], великі концентрації важких металів та гормонів, що призводить до пригнічення росту рослин, а також до кумулятивного ефекту цих компонентів у ґрунті.

Відмічається, що різні види культур неоднаково реагують на біогазові дигестати. Наприклад, інші рослини з родини Пасльонові потребують великої кількості поживних речовин, тому для менш вибагливих рослин (наприклад, салат) дигестати будуть проявляти свої корисні властивості. Низька концентрація макроелементів у дигестаті на основі гною корів не стала придатним середовищем для вирощування томатів на гідропоніці [34]. Саме тому справедливо стверджувати, що концентрація поживних речовин дигестату залежить від використовуваних субстратів, умов анаеробного зброджування та методів оброблення дигестатів.

Зразки дигестату на основі осаду стічних вод показали стовідсоткову придатність як біодобриво для росту томатів. Результати нашого експерименту загалом узгоджуються з дослідженням [35], у якому рідкий, центрифугований та осушений дигестат з осаду стічних вод застосовували для росту томатів на піщаному ґрунті й комерційному торф'яному субстраті в тепличних умовах. На помідори, які обприскували анаеробним дигестатом, не спостерігали фітотоксичного впливу, відбулося збільшення біомаси до 37,5 разів і висоти – до 6 разів порівняно з контрольними необробленими

зразками, а також у 12,7 і 2,5 рази відповідно, ніж у разі оброблення мінеральними добривами.

За результатами дослідження встановлено, що дигестат як на основі курячого посліду, так і на основі осаду стічних вод із додаванням ФГ та без ФГ відповідає вимогам екологічної безпеки та може бути застосований у складі біокомпозиту для очищення забруднених ґрунтів.

Висновки

Для екологічно безпечного використання дигестату в складі біокомпозиту, який запропонували й розробили автори в попередніх працях для очищення ґрунтів від важких металів, та одночасного покращання росту рослин обґрунтована доцільність застосування тестів для визначення фітотоксичності субстратів. У роботі були проведені експерименти з пророщення насіння перцю в чашках Петрі, в які додавали водні розчини дигестатів на основі двох видів місцевої сировини (курячого посліду й осаду стічних вод). Аналізування індексу проростання насіння дозволило оцінити рівень екологічної безпеки субстратів. Зразки необробленого дигестату та обробленого ФГ на основі осаду стічних вод перетнули межу 50 %, що свідчить про їх безпечність для росту насіння перців. Зразки дигестату на основі курячого посліду оброблені ФГ на 20-ту добу АЗ не досягли позначки 50 %. Проте індекс проростання підвищився на 30-ту добу проведення АЗ, що свідчить про зниження токсичності матеріалу після закінчення процесу АЗ.

Обидва види дигестатів мають біодобрувальний потенціал за умови правильного підбору методів оброблення та визначення зрілості матеріалу для уникнення фітотоксичного впливу на рослини й забезпечення екологічної безпеки для ґрунтового середовища.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення й екологічно безпечне впровадження та апробацію в польових умовах біотехнології ремедіації ґрунтів на основі використання біокомпозиту з дигестату й фосфогіпсу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гончарук І. В. Європейські практики регулювання та поведження з дигестатом у контексті агроекологічного переходу країн ЄС у межах європейського зеленого курсу. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2023. № 3. С. 144-155. DOI: 10.37128/2411-4413-2023-3-10.
2. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / за ред. Г. Гелетуки. Київ : Академперіодика, 2022. 373 с. DOI: 10.15407/akademperiodyka.464.373.
3. Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives / M. Malhotra et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 166. Art. 112642. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112642.
4. Digestate Potential to Substitute Mineral Fertilizers: Engineering Approaches / I. Yu. Ablieieva. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. Vol. 9. Issue 1. Pp. H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2022.9(1).h1.
5. Conversion of anaerobic digestates from biogas plants: Laboratory fertilizer formulation, scale-up and demonstration of applicative properties on plants / D. Skrzypczak et al. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 203. Pp. 506-517. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.080.
6. Effects of digestate DOM on the chemical behavior of soil heavy metals in abandoned copper mining areas / X. Guo et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122436.
7. Забруднення земель внаслідок агресії росії проти України / А. Сплодитель, О. Голубцов, С. Чумаченко, Л. Сорокіна. *Екодія* : вебсайт. URL: <https://ecoaction.org.ua/> (дата звернення: 15.11.2023).
8. Вдосконалений критерій в методі оцінювання рівня безпеки процесу рекультивациі земель місць знешкодження та знищення боєприпасів / В. А. Андронов та ін. *Техногенно-екологічна безпека*. 2022. Вип. 12 (2/2022). С. 43-50. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.6.
9. Забруднення ґрунтів важкими металами в місцях падіння авіабомб та згорілої техніки: дослідження в Сумській області. *SuperAgronom.com* : вебсайт. URL: <https://superagronom.com/> (дата звернення: 15.11.2023).
10. Narayanan M., & Ma Y. Mitigation of heavy metal stress in the soil through optimized interaction between plants and microbes. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 345. Art. 118732. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118732.
11. Biological roles of soil microbial consortium on promoting safe crop production in heavy metal(loid) contaminated soil: A systematic review / N. Wang et al. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 912. Art. 168994. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168994.
12. Application of technological solutions for bioremediation of soils contaminated with heavy metals / Y. Chernysh et al. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8, Issue 2. Pp. H8–H16. DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).h2.
13. Antibiotics and antibiotic resistance genes in anaerobic digesters and predicted concentrations in agroecosystems / A. Visca et al. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 301. Art. 113891. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113891.
14. The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania / A. Slepiciene et al. *Waste Management*. 2020. Vol. 102. Pp. 441-451. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.11.008.
15. Effects of liquid digestate pretreatment on biogas production for anaerobic digestion of wheat straw / T. Liu et al. *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 280. Pp. 345-351. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.01.147.
16. Life cycle assessment of digestate post-treatment and utilization / E. Angouria-Tsorochidou, M. Seghetta, A. Trémier, M. Thomsen. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 815. Art. 152764. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152764.
17. Ammonium nitrogen recovery from digestate by hydrothermal pretreatment followed by activated hydrochar sorption / T. Zhang et al. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 379. Art. 122254. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122254.
18. Reactor performance and energy analysis of solid state anaerobic co-digestion of dairy manure with corn stover and tomato residues / Y. Li et al. *Waste Management*. 2018. Vol. 73. Pp. 130-139. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.11.041.
19. Гелетука Г., Кучерук П., Матвеев Ю. Перспективи виробництва біометану в Україні. *Аналітична записка UABIO*. 2022. № 29. 60 с.
20. The potential of organic waste as a substrate for anaerobic digestion in Ukraine: trend definitions and environmental safety of the practices / Y. Chernysh. *Environmental Problems*. 2021. Vol. 6, № 3. Pp. 135-144. DOI: 10.23939/ep2021.03.135.
21. Assessing the potential phytotoxicity of digestate from winery wastes / Da Ros. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 150. Pp. 26–33. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.12.029.
22. Gell K., van Groenigen J., Cayuela M. L. Residues of bioenergy production chains as soil amendments: Immediate and temporal phytotoxicity. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 186, Issue 2–3. Pp. 2017-2025. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.105.
23. Сворцова П. О., Аблєєва І. Ю. Визначення рівня фітотоксичності дигестату за допомогою індексу проростання насіння. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма X Всеукр. наук.-техн. конф., 18–21 квіт. 2023 р. Суми : Сумський державний університет, 2023. С. 161-162.
24. Effect of temperature and storage methods on liquid digestate: Focusing on the stability, phytotoxicity, and microbial community / J. Yan et al. *Waste Management*. 2023. Vol. 159. Pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.01.023.
25. Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment / A. Pivato. *Waste Management*. 2016. Vol. 49. Pp. 378-389. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.12.009.
26. Душкін С. С. Зниження рівня техногенної небезпеки негативного впливу осаду міських стічних вод на навколишнє середовище за допомогою гумінових речовин. *Техногенно-екологічна безпека*. 2021. Вип. 10 (2/2021). С. 70-74. DOI: 10.52363/2522-1892.2021.2.11.
27. Nitrogen availability in digestates from full-scale biogas plants following soil application as affected by operation parameters and input feedstocks / J. O. Nyang'au, P. Sørensen, H. B. Møller. *Bioresource Technology Reports*. 2023. Art. 101675. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101675.
28. Evaluating the impact of substrate addition for anaerobic co-digestion on biogas production and digestate quality: The case of deinking sludge / Y. Bareha et al. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 319. Art. 115657. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115657.
29. ISO 18763:2016. "Soil quality – Determination of the toxic effects of pollutants on germination and early growth of higher plants".
30. Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa L.*) cultivation / D. Ronga et al. *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 244. Pp. 172-181. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.09.037.
31. Key factors affecting seed germination in phytotoxicity tests during sheep manure composting with carbon additives / G. Wang. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 421. Art. 126809. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126809.
32. Technologies for Environmental Safety Application of Digestate as Biofertilizer / I. Ablieieva et al. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2022. Vol. 23, Issue 3. Pp. 106-119. DOI: 10.12912/27197050/147154.
33. Management of poultry manure in Poland – Current state and future perspectives / D. Drózdź et al. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 264. Art. 110327. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110327.
34. Biogas digestates are not an effective nutrient solution for hydroponic tomato (*Lycopersicon esculentum L.*) production under a deep water culture system / H. A. Mupambwa et al. *Heliyon*. 2019. Vol. 5, Issue 10. Art. e02736. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02736.
35. Anaerobic digestates from sewage sludge used as fertilizer on a poor alkaline sandy soil and on a peat substrate: Effects on tomato plants growth and on soil properties / G. Cristina et al. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 269. Art. 110767. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110767.

Skvortsova P., Ablicieva I.**ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE TECHNOLOGY OF HANDLING DIGESTATE OF DIFFERENT GENESIS**

In the modern world, biogas technology is gaining momentum as an ecological alternative to the production of biofertilizer after anaerobic fermentation of various types of waste. Due to the large amount of organic, nutrient and biologically active substances, biogas digestates are often applied directly to the soil as an organic fertilizer to improve soil quality and increase yield.

The purpose of the article is to determine the ecological safety of the digestate obtained after anaerobic fermentation of chicken litter and sewage sludge, as part of a biocomposite for soil purification from heavy metals. The methodological basis of this study are experiments on the phytotoxicity of digestate samples based on the results of the germination of pepper seeds in Petri dishes using aqueous solutions of untreated digestate and digestate treated with phosphogypsum. The expediency of choosing a phosphogypsum treatment method was due not only to the possibility of reducing the presence of pathogens in digestates, but also to obtain a biocomposite capable of adsorbing harmful elements from the soil and feeding it with necessary substances. Using the germination index, the level of phytotoxicity of digestate based on various organic wastes was assessed, the effectiveness of the use of digestate as a biological fertilizer was substantiated.

It was determined that digestate based on sewage sludge became an ecologically safe substrate for the germination of pepper seeds. Digestate from chicken litter treated with phosphogypsum on the 20th day of anaerobic fermentation showed a phytotoxic effect on pepper seeds. Indicators of the germination index increased on the 30th day of anaerobic fermentation, which indicates a decrease in the toxicity of the material after the end of the anaerobic fermentation process. In general, a germination index higher than 50% was observed in all samples of untreated digestate and a greater number of samples of treated digestate for both substrates. The article provides recommendations for evaluating the maturity of digestate using the seed germination index as a quick indicator for determining the phytotoxicity of substrates and, accordingly, the level of environmental safety of the material for soil and plants.

Key words: anaerobic fermentation, biocomposite, soil degradation, chicken litter, sewage sludge, phosphogypsum, phytotoxicity.

REFERENCES

- Goncharuk, I. V. (2023). Jevropejs'ki praktyky reguljuvannja ta povodzhennja z dygestatom u konteksti agroekologichnogo perehodu kraï'n JeS u mezhah jevropejs'kogo zelenogo kursu [European practices of regulation and handling of digestate in the context of the agro-ecological transition of the EU countries within the framework of the European green course]. *Economics, finance, management: topical issues of science and practice*, 3, 144-155. DOI: 10.37128/2411-4413-2023-3-10. [in Ukrainian]
- Geletuha, G. (eds.). (2022). *Vyrobnycтво energii' z biomasy v Ukraïni: tehnologii', rozvytok, perspektyvy* [Production of energy from biomass in Ukraine: technologies, development, prospects]. Kyïv: Akadempriodyka. DOI: 10.15407/akadempriodyka.464.373. [in Ukrainian]
- Malhotra, M., Aboudi, K., Pisharody, L., Singh, A., Rajesh Banu, J., Bhatia, S. K., Varjani, S., Kumar, S., González-Fernández, C., Kumar, S., Singh, R., & Tyagi, V. K. Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112642. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112642.
- Ablicieva, I. Yu., Geletuha, G. G., Kucheruk, P. P., Enrich-Prast, A., Carraro, G., Berezhna, I. O., & Berezhnyi, D. M. Digestate Potential to Substitute Mineral Fertilizers: Engineering Approaches. *Journal of Engineering Sciences*, 9(1), H1–H10. DOI: 10.21272/jes.2022.9(1).h1.
- Skrzypczak, D., Trzaska, K., Mikula, K., Gil, F., Izydorczyk, G., Mironiuk, M., Polomska, X., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2023). Conversion of anaerobic digestates from biogas plants: Laboratory fertilizer formulation, scale-up and demonstration of applicative properties on plants. *Renewable Energy*, 203, 506-517. DOI: 10.1016/j.renene.2022.12.080.
- Guo, X., Xie, X., Liu, Yu., Wang, C., Yang, M., & Huang, Y. (2020). Effects of digestate DOM on the chemical behavior of soil heavy metals in abandoned copper mining areas. *Journal of Hazardous Materials*, 393. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122436.
- Spodytel' A., Golubcov O., Chumachenko S., Sorokina L. (2023). *Zabrudnennja zemel' vlaslidok agresii' rosii' proty Ukraïny* [Land pollution as a result of Russia's aggression against Ukraine]. Ecodiya. URL: <https://ecoaction.org.ua/>. [in Ukrainian]
- Andronov, V. A., Didoveys, Yu. Yu., Koloskov, V. Yu., Koloskova, H. M., & Jinadu, A. (2022). Vdoskonalenyj kryterij v metodi ocinjuvannja rivnja bezpeky procesu rekultyvacii' zemel' misc' zneskodzhennja ta znyskhennja bojeprypysiv [An improved criterion in the method of assessing the level of security of the process of land reclamation of the sites of neutralization and destruction of munitions]. *Technogenic and ecological safety*, 12(2/2022), 43-50. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.6. [in Ukrainian]
- SuperAgronom.com. (2023). *Zabrudnennja g'runtiv vazhkymy metalamy v miscjah padinnja aviabomb ta zgoriloi' tehniki: doslidzhennja v Sums'kij oblasti* [Soil pollution by heavy metals in the places where aerial bombs fell and burnt equipment: research in Sumy region]. URL: <https://superagronom.com/>. [in Ukrainian]
- Narayanan, M., & Ma, Y. (2023). Mitigation of heavy metal stress in the soil through optimized interaction between plants and microbes. *Journal of Environmental Management*, 345, 118732. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118732.
- Wang, N., Wang, X., Chen, L., Liu, H., Wu, Y., Huang, M., & Fang, L. (2024). Biological roles of soil microbial consortium on promoting safe crop production in heavy metal(loid) contaminated soil: A systematic review. *Science of the Total Environment*, 912, 168994. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168994.
- Chernysh, Y., Plyatsuk, L., Roubik, H., Yakhnenko, O., Skvortsova, P., & Bataltsev, Y. Application of technological solutions for bioremediation of soils contaminated with heavy metals (2021). *Journal of Engineering Sciences*, 8(2), H8–H16. DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).h2.
- Visca, A., Rauseo, J., Spataro, F., Patrolocco, L., Grenni, P., Massini, G., Mazzurco Miritana, V., & Barra Caracciolo, A. (2022). Antibiotics and antibiotic resistance genes in anaerobic digesters and predicted concentrations in agroecosystems. *Journal of Environmental Management*, 301, 113891. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113891.
- Slepetiene, A., Volungevicius, J., Jurgutis, L., Liaudanskiene, I., Amaleviciute-Volunge, K., Slepetyus, J., & Ceseviciene, J. (2020). The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. *Waste Management*, 102, 441-451. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.11.008.
- Liu, T., Zhou, X., Li, Z., Wang, X., & Sun, J. (2019). Effects of liquid digestate pretreatment on biogas production for anaerobic digestion of wheat straw. *Bioresource Technology*, 280, 345-351. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.01.147.
- Angouria-Tsorochidou, E., Seghetta, M., Trémier, A., & Thomsen, M. (2022). Life cycle assessment of digestate post-treatment and utilization. *Science of The Total Environment*, 815, 152764. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152764.
- Zhang, T., Wu, X., Shaheen, S. M., Zhao, Q., Liu, X., Rinklebe, J., & Ren, H. (2020). Ammonium nitrogen recovery from digestate by hydrothermal pretreatment followed by activated hydrochar sorption. *Chemical Engineering Journal*, 379, 122254. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122254.
- Li, Y., Xu, F., Li, Y., Lu, J., Li, S., Shah, A., Zhang, X., Zhang, H., Gong, X., & Li, G. Reactor performance and energy analysis of solid state anaerobic co-digestion of dairy manure with corn stover and tomato residues. *Waste Management*, 73, 130-139. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.11.041.
- Geletuha G., Kucheruk P., Matvjejev Ju. (2022). *Perspektyvy vyrobnycтва biometanu v Ukraïni* [Prospects for biomethane production in Ukraine]. *Analytical note UABIO*, 29. [in Ukrainian]
- Chernysh, Y., Shtepa, V., Roy, I., Chubur, V., Skvortsova, P., Ivlieva, A., & Danilov, D. (2021). The potential of organic waste as a substrate for anaerobic digestion in Ukraine: trend definitions and environmental safety of the practices. *Environmental Problems*, 6(3), 135-144. DOI: 10.23939/ep2021.03.135.
- Da Ros, C., Libralato, G., Ghirardini, A. V., Radaelli, M., & Cavinato, C. Assessing the potential phytotoxicity of digestate from winery wastes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 150. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.12.029.
- Gell, K., van Groenigen, J., & Cayuela, M. L. (2011). Residues of bioenergy production chains as soil amendments: Immediate and temporal phytotoxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 2017-2025. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.105.

23. Skvortsova, P. O., Ablieieva, I. Yu. (2023). Vyznachennja rivnja fitotoksichnosti dygestatu za dopomogoju indeksu prorostannja nasinnja [Determination of the level of phytotoxicity of digestate using the seed germination index]. *Suchasni tehnologii' u promyslovomu vyrobnyctvi : materialy ta programa X Vseukr. nauk.-tehn. konf.*, 18–21 kvit. 2023 r. Sumy : Sums'kyj derzhavnyj universytet, 161-162. [in Ukrainian]
24. Yan, J., Chen, X., Wang, Z., Zhang, C., Meng, X., Zhao, X., Ma, X., Zhu, W., Cui, Z., & Yuan, X. (2023). Effect of temperature and storage methods on liquid digestate: Focusing on the stability, phytotoxicity, and microbial community. *Waste Management*, 159, 1-11. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.01.023.
25. Pivato, A., Vanin, S., Raga, R., Lavagnolo, M. C., Barausse, A., Rieple, A., Laurent, A., & Cossu, R. (2016). Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment. *Waste Management*, 49, 378-389. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.12.009.
26. Dushkin, S. S. (2021). Znyzhennja rivnja tehnogennoi' nebezpeky negatyvnogo vplyvu osadu mis'kyh stichnyh vod na navkolysnhje seredovysshje za dopomogoju guminovyh rehovyn [Reducing the level of technogenic danger of the negative impact of urban sewage sludge on the environment with the help of humic substances]. *Technogenic and ecological safety*, 10 (2/2021), 70-74. DOI: 10.52363/2522-1892.2021.2.11.
27. Nyang'au, J. O., Sørensen, P., & Møller, H. B. (2023). Nitrogen availability in digestates from full-scale biogas plants following soil application as affected by operation parameters and input feedstocks. *Bioresource Technology Reports*, 101675. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101675.
28. Bareha, Y., Faucher, J.-P., Michel, M., Houdon, M., & Vaneeckhaute, C. (2022). Evaluating the impact of substrate addition for anaerobic co-digestion on biogas production and digestate quality: The case of deinking sludge. *Journal of Environmental Management*, 319, 115657. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115657.
29. ISO 18763:2016. "Soil quality – Determination of the toxic effects of pollutants on germination and early growth of higher plants".
30. Ronga, D., Setti, L., Salvarani, C., De Leo, R., Bedin, E., Pulvirenti, A., Milc, J., Pecchioni, N., & Francia, E. Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa L.*) cultivation. *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 244. Pp. 172-181. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.09.037.
31. Wang, G., Yang, Y., Kong, Y., Ma, R., Yuan, J., & Li, G. (2022). Key factors affecting seed germination in phytotoxicity tests during sheep manure composting with carbon additives. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126809. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126809.
32. Ablieieva, I., Berezhna, I., Berezhnyi, D., Enrich-Prast, A., Geletuha, G., Lutsenko, S., Yanchenko, I., & Carraro G. (2022). Technologies for Environmental Safety Application of Digestate as Biofertilizer. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 23(3), 106-119. DOI: 10.12912/27197050/147154.
33. Drózdź, D., Wystalska, K., Malińska, K., Grosser, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. (2020). Management of poultry manure in Poland – Current state and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 264, 110327. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110327.
34. Mupambwa, H. A., Namwoonde, A. S., Liswaniso, G. M., Hausiku, M. K., & Ravindran, B. (2019). Biogas digestates are not an effective nutrient solution for hydroponic tomato (*Lycopersicon esculentum L.*) production under a deep water culture system. *Heliyon*, 5(10), e02736. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02736.
35. Cristina, G., Camelin, E., Tommasi, T., Fino, D., & Pugliese, M. (2020). Anaerobic digestates from sewage sludge used as fertilizer on a poor alkaline sandy soil and on a peat substrate: Effects on tomato plants growth and on soil properties. *Journal of Environmental Management*, 269, 110767. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110767.